待ち行列ネットワークモデルによる都市空間のシミュレーション

その1 建物クラスター内の滞在時間・滞在量が街路ネットワークに与える影響

QUEUEING NETWORK SIMULATION METHOD FOR URBAN NETWORK STUDIES

1 Influence of service time and value of building cluster on street network

太田 浩 史*

Hiroshi OTA

Studies on urban networks often focus only on street systems, such as streets as links and junctions as nodes. This paper proposes the evaluation model for "Building-nodes", to examine how they contribute to the whole urban network. By the method of discrete system simulation, which is often used for evaluation of TCP/IP protocol studies, the author introduce the approach to treat urban network as the queueing network where "end-node congestion controls" are possible, to change the service time rate or numbers of service of the building. The result of simulation on Ginza shows the potentials of queueing network approach, and the advantage of decentralized intervention on urban network.

Keywords : *Street Network, Queueing Network, Building Node, Multi Agent Simulation*

街路ネットワーク, 待ち行列ネットワーク, 建物ノード, マルチエージェントシミュレーション

1. 研究の目的

都市空間をネットワークとして捉える視点は、歴史的にも幾度も提示されている。19世紀後半、オースマンがパリ大改造において下水道と並木道を持つブルーパール＝リンクと鉄道の駅舎＝ノードを同時に整備した際、彼はフランス語でネットワークを意味する「Reseau」という言葉でその効用を説明した¹⁾。18世紀に遡れば、数学者オイラーがグラフ論の源となる考察をドイツのケーニグスベルグにおいて行っており、これは「ケーニグスベルグの橋」問題として今も良く知られている²⁾。20世紀にはリンチがボストンにバス、ノードなどの要素を見出し、都市空間のシーケンスをネットワーク用語を用いて説明している³⁾。

このような蓄積を持つネットワーク論であるが、建築がどのように関わっているかを考察した論は少ない。近年の都市再生論においても、バルセロナやコペンハーゲン等を例に、公共空間ネットワークの効果を考察する視点は存在するが⁴⁾、ネットワークを回遊する人々が出発し、到着する建築の役割についての言及は少ない。実際、バルセロナもコペンハーゲンも魅力的な建築をネットワークに沿って配置することで回遊性を高めており、オースマンの例も駅舎とブルーパールが不可分の関係であることを示唆しているのだが、建物などのようにネットワークに貢献しているかの論は少ない。

本論は、このような問題意識に基づき、建物と街路が統合されたネットワークモデルを構築し、建物規模や配置がどのようにネットワーク上の歩行者流動に影響を及ぼすかを考察する。具体的には、建

物ノードをエンドに持つネットワークモデルを作成し、建築規模と配置の違いがネットワーク上の歩行者流動にどのような影響を与えるかを考察する。待ち行列ネットワークを用いる目的は2つあり、ひとつは待ち行列によって時間と空間を関連づけること、もうひとつは通常は輻輳・渋滞として否定的に捉えられる「待ち」を、歩行者の滞留＝賑わいとして捉え、建築ノードの規模や配置といった属性が、ネットワーク上にどのように滞留を生じるかを評価するモデルを構築することにある。未踏の分野であるために考察すべき点が多く、個々の建物の役割に議論を到達させるには紙面が限られているため、本稿ではまず都市空間を建物によって構成されるクラスターに分け、その分析を通して待ち行列モデルの基本的性格についての考察を行う。

2. 研究の背景

2-1. 街路ネットワークに関する既往研究

街路ネットワークによる分析手法として最も知られているのは Hilier & Hanson⁵⁾ による Space Syntax 法である。これは隣接関係によって街路に評価値を与え、回遊行動、土地利用、建物集積度といった都市事象との相関を分析する手法であるが、街路を点、交差点を線に置き換えるプロセスによって、距離空間が捨象されるという欠点を持っている。この欠点を補うべく提示されたのが、Porta および Crucitti⁶⁾ による「Multiple Centrality Assessment(MCA)」であり、これは距離空間を保ちつつ、直進中心性、媒介中心性など

* 東京大学生産技術研究所 講師・工修

Lecturer, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, M. Eng.

の指標を使って街路ネットワークの分析を行う手法である。これらの指標は近年展開がめざましい複雑ネットワークの研究分野において利用されるものであり、都市空間への応用は注目すべきものがあるが、分析対象である街路ネットワークに建物は含まれてはいない。

建築を街路ネットワークと連係させようという試みは、MCA に建物情報を加えることを目標とした Sevtsuk⁷⁾による研究が挙げられる。しかし、これは建物ノード個々の分析を目的とするものではなく、街路の属性に建物情報を加えることで、街路ネットワークの構造分析を行うことを目的としている。他に建物を街路ネットワークに連繋させた研究としては、建物重心からエージェントを避難させる目黒・織田⁸⁾のマルチエージェントシミュレーションが挙げられるが、これも建物個々の役割を問うものではない。これらの状況を踏まえても、建物を統合した街路ネットワーク（以降、「建物街路ネットワーク」と呼ぶ）は未踏の研究領域であることが伺える。

2-2. 待ち行列ネットワークに関する既往研究

待ち行列理論は1909年にErlangが行った電話交換機の研究に端を欲した、確率論を用いた混雑・輻輳モデルの解析理論である。この理論によると、銀行の窓口などのサービス窓口時間に時間当たりの到着人員（到着率） λ があった場合、サービス時間を含めた待ち時間を W とすると、リトルの公式により系内平均客数 L は式(1)となる。

$$L = \lambda W \quad (1)$$

図1 待ち行列のモデル

この時、待ち時間が所与であれば系内の平均客数は直ちに判明するが、到着時間、サービス時間のばらつき具合、さらにサービス窓口の戸数に応じて待ち時間は変動する。待ち行列理論はこれに即した数理モデルを提供するものである。待ち行列が単数サーバー待ち行列 M/M/1 タイプ、つまり顧客の到着がポアソン分布、サービスに要する時間が指数分布に従い、サービス窓口数が1つである場合、到着人員 λ を時間当たりの被サービス人数（サービス率） μ で除した窓口利用率 ρ 、および系内の平均客数 L は式(2)および式(3)のように求められる。

$$\rho = \lambda / \mu \quad (2)$$

$$L = \rho / (1 - \rho) \quad (3)$$

窓口が1つの場合、系内平均客数は上記のように平易に求められるが、これが c 個のサービス窓口を持つ複数サーバー待ち行列 M/M/c の場合、平均客数の算出式は式(4)のように複雑なものとなる。

$$L = c\rho + \frac{(c\rho)^{c+1} P_0}{c(c!)(1-\rho)^2} \quad (4)$$

式(4)において P_0 は c 個の窓口で客が1人もいない確率であり、 $P_1 + P_2 + \dots + P_{c-1}$ のように、窓口1個、2個、 $c-1$ 個に顧客がいる確率の総和を1から減じた後に求められる値である。この手続きからも分かるように、複数個のサービス窓口を持つ待ち行列の挙動の把握は非常に複雑であるため、理論的把握だけではなく、シミュレーションによる待ち行列研究が広く行われている。

待ち行列ネットワークは、図1に示した待ち行列を図2のように複数配置して連関するネットワークとして捉えたものであり、例えば料金所の渋滞が複数連なる高速道路網、組立行程が複数あるような製品の生産ラインの分析などに利用される。

図2 待ち行列ネットワークの基本モデル

待ち行列ネットワークの都市的事象への応用については、病院の平面計画を待ち行列ネットワークに置き換え、その動線計画を分析した Smith⁹⁾の研究や、行列が複数発生するテーマパークでいかに効率的にアトラクションを訪問できるかを扱う、川村¹⁰⁾による「テーマパーク問題」など多くを見ることができる。街路ネットワークに関しては Blanchard¹¹⁾が、ノードとなる交差点や広場の滞在可能人数を無限であると想定し、M/M/c タイプの待ち行列によるモデル化を行っている。また、待ち行列を用いたシミュレーションは「離散系シミュレーション」と総称され、VISUM、SIMUL8、AnyLogicなどのソフトによる交通網、避難経路、生産システムやサプライチェーンなどネットワーク評価が一般的に行われている。しかし、ここで重要なのは、これらの分析においては、待ち行列ネットワークで扱われるイベントは継時的に生じるものであり、ネットワークはその継時的事象の構造を表わしている、ということである。つまり、図2に見るように、道路上の自動車にせよ、組み立て途中の製品にせよ、ネットワーク上のウォーカーは必ず待ち行列のノードを通過して、最終地点に到達する。このとき、出発点と到達点は待ち行列として扱われない。

この前提は、建築ノードがいかに街路ネットワーク上の歩行者流動に影響を与えるかを考察する本稿の目的とは一致しない。なぜならば、待ち行列ネットワークが経路上の待ちや混雑しか扱えないとするならば、モデル化が可能なのは街路ネットワーク上に存在する交差点、広場に限られてしまうからである。都市内を移動する時、私たちは建物を渡り歩くのではなく、一旦建物を出て、街路ネットワークを経由し、その後目的とする建物に到着する。それを考慮すると、まず本稿でモデル化を試みるべきは、図3で表すような出発点と到達点である建物を待ち行列とし、交差点や広場を必ずしも待ち行列とはしないネットワークモデルということになる。勿論、

建物内に街路ネットワークが貫入したり、ネットワーク上のノードが広場のように滞在場所や終着点になる場合も考えられるが、本稿における考察の対象は待ち行列がエンドに配されたネットワークに限定する。

図3 モデル化すべき待ち行列ネットワーク

2-3. コンピュータネットワークにおける輻輳制御

ネットワーク上の経由点ではなく、その出発点と到着点の挙動に焦点を当てた研究分野はすでに存在する。それはコンピュータネットワークにおける輻輳制御の研究であり、ネットワーク上に接続したサーバーがどのようなプロトコルでデータを送受するかを扱う分野である。街路と同様に、インターネットや LAN もトラフィックを持つネットワークであるため、ネットワーク上には渋滞＝データ輻輳が発生する。その軽減方法として、たとえば容量の大きいケーブルや処理能力の高いルーターに交換するといった物理的手法、ルーターが負荷の少ない経路に誘導する負荷分散型ルーティングなどの手法がある。これは街路ネットワークで言えば、道幅の拡張や経路選択の質の向上などに相当する。

その一方、データを送るサーバーがデータ送信量を調節することで、ネットワーク上の輻輳の影響を避けようとする仕組みがある。TCP/IP の TCP (Transmission Control Protocol) で定められているスロースタート・輻輳回避モードがそれにあたり、最初は少なく送り出したデータ量を少しずつ増やし、送信ルート上で輻輳が生じたところで、データ量を半減させる。輻輳の検知はルート上のルーターなどの処理が追いつかず、パケットが棄却されることによって行われるため、送信サーバーがデータ転送ルートの状況を観察しながら送るデータを調節することができる。このような制御方法は「エンドノード主体の輻輳制御」と呼ばれ、ルーターやハブによる「中継ノード主体の輻輳制御」とは別に定められた、通信プロトコルの根幹をなす仕組みである。

本稿では、このエンドノードによる輻輳制御という発想を街路ネットワークに対する建築ノードの役割の分析に取り入れる。図4に表したように、街路ネットワークを通信ネットワークに、建物をサーバーに置き換えると、人や物の流れはデータの流として捉えることができる。

図4 建物のネットワークとサーバーのネットワーク

人や物の出発点である建物が、さまざまな量またはタイミングで人や物を送り出したとき、ネットワーク上にはどのような輻輳＝混雑が生じるだろうか。また、通信ネットワークでは輻輳は避けるべき現象だが、都市空間においては混雑＝賑わいと積極的に評価することも可能である。そうであるならば、建築的な操作によって、混雑を効果的に配置することは可能だろうか。本研究では、通信ネットワークの分析手法に習い、歩行者流動をフローと想定した時のネットワークの挙動をシミュレーションによって明らかにする。

3. 研究の方法

3-1. 建物街路ネットワークのデータ整備

シミュレーター開発の準備作業として、建物がエンドノードとして付加された建物街路ネットワークを作成した。街路ネットワークデータについては、道路中心線情報が無償で得られる Open Street Map (www.openstreetmap.org) のデータが存在するが、精度が低く、道路車線によって複線化されているために加工が必要であったため、ArcGIS 上で修正を加えたものを利用した。建物位置、階数及び床面積などの建物ノード情報については「ZmapTownII 2008/09 年度 (Shape 版) 東京都 データセット」^{注1)} を使用した。データ処理システムは Java を用いて独自に構築し、GIS データの読み込みはオープンソースで入手可能な GeoTools 2.1.0、処理内容の可視化は Processing 1.5 のプラグインを Java によるプログラムに組み込んで行っている。

分析対象地域は東京 23 区内から銀座地区を選択し、その 1.5km × 1.5km の範囲をデータ化した。銀座地区を選択した理由は、図5のように建物の床面積の対数正規分布を取ると、その分布の尖度が 0.15 と大中小規模建物がバランスよく存在する事が分かっており、さまざまな規模の建物の影響をシミュレーションによって観察することに適していると考えたことが理由である。

図5 銀座地区の建物規模の対数正規分布

作成した建物街路ネットワークの諸元を表1に、そのネットワーク図を図6に示した。表1において、1.の交差点ノードが道路中心線データに含まれていたノード情報、3.の建物ノードは建物情報に含まれていた図形重心の情報、2.の分岐ノードは建物重心から近傍の街路に降ろした最短点で、新たに作成したノードである。このうち、3.の建物ノードが考察の対象とするエンドノード、1.および2.が街路ネットワーク上の中継ノードである。

表1 建物街路ネットワークの諸元

中継ノード		エンドノード	総ノード数	リンク数
1.交差点ノード	2.分岐ノード	3.建物ノード		
858	3,822	4,545	9,225	9,653

図 6 作成した建物街路ネットワーク

3-2. Girvan-Newman 法による建物ノードのクラスタリング

観察すべき建物ノードが数千と大量であるために、建物個々の役割を考察する前に 40～50 ほどの建物クラスターを作成し、建物街路ネットワークモデルの一般的性格を把握する。ネットワークのクラスタリング手法については、社会ネットワーク分析、WWW などインターネットネットワーク構造の分析の分野において、コミュニティ抽出手法が多く研究されているが、その中でも最もよく知られた Girvan-Newman 法¹²⁾を用いてクラスタリングを行う。

Girvan-Newman 法は与えられたネットワークにおいて最も高い媒介中心性 B_c を持つリンクを 1 つずつ取り除き、ネットワークを分割する手法である。媒介中心性とは、ネットワーク上の任意の 2 点の最短経路を取ったとき、あるノード i またはリンク i がその経路上に含まれる頻度を表した指標であり、街路ネットワークで言えば交差点や街路の通行頻度を表す値である。銀座地区を例にすると、有楽町・日比谷から人が多く流入してくるのは一連のガード下の通路であり、その通過頻度は他の場所に比べて高いため、媒介中心性が高く現れる。そのなかで最も媒介中心性が高いリンクをネットワークから除去し、リンクが 1 つ減ったネットワークを再計算し、次に媒介中心性が高く現れたリンクを除去するというステップを繰り返すのが Girvan-Newman 法である (図 7)。このとき、分割ステップがリンク数がゼロになるまで続かないように、個々のクラスター内のリンク数に対するクラスター間のリンク数の割合を示すモジュラリティ=Q 値と呼ばれる指標を設定し、Q 値が最も高いステップをクラスター分割の最適解として採用し、計算は終了する。

図 7 Girvan-Newman 法によるクラスタリング(ステップ 2→3)

ネットワーク上の任意の 2 点間の全ての最短距離をステップ毎に求めていく Girvan-Newman 法の欠点は、計算量が大変多いということであり、より高速な Girvan 法、CSM 法などの改良手法が提案されている。しかしながら、本研究で扱う建物ノードは重み(延床面積)を持っており、それに考慮した媒介中心性の算出(4-1 にて詳述)が必要のため、ノードの重みを考慮可能な Girvan-Newman 法を用いて対象地区のクラスタリングを行い、46 というクラスターを得た。その結果を表 2 および図 8 に示す。

表 2 銀座地区のクラスターの諸元

クラスター数	Q 値 (注 2)	クラスター内建物数			クラスター内延床面積(m ²)		
		平均	最小	最大	平均	最小	最大
46	0.933	200	14	716	189,222	64,169	720,549

図 8 銀座地域のクラスタリング結果(46 クラスター)

Girvan-Newman 法によるクラスタリングの利点は (1) クラスタリングが街路ネットワークに沿って行われるため、回遊行動と建物の関係を記述しやすい、(2) リンクの媒介中心性の高さがクラスター分けの基準となるため、線路、川などの強い境界でクラスターが分割される、という点にある。本稿ではそれに加え、ノードの重み(延床面積)を計算時に考慮したため、例えば大規模建築の多い丸の内が過小評価され、小規模建築が多い築地が過大評価される、ということを避けることができた。

3-3 マルチエージェントシミュレーションプログラムの開発

先述したように、待ち行列ネットワークをシミュレーションできる離散系シミュレーションソフトは広く使われているが、ノード規模が数千というネットワークに対応し、また街路ネットワークや建物輪郭線などの空間情報をインポートできるものは存在しないため、シミュレーションプログラムを作成した。プログラムは Java を用いて構築し、ネットワーク上を多数のエージェントがランダムウォークするマルチエージェントシミュレーション(MAS)とした。3-1

で作成した建物街路ネットワークデータは汎用ネットワーク記述言語である XGMML 形式で管理し、3-2 で作成したダイクストラ計算によるルーティング情報や建物外形線情報とともに読み込んでいる。全体の進行管理は Java アプレットによって行い、ネットワーク状況のアニメーションは Java と親和性が高い Processing で表現した。プログラムの主要クラスとその関係は図 9 の通りである。

図 9 シミュレーションプログラムの概要

2-3 で述べたように、本稿において待ち行列属性を与えるのはエンドノードである建物ノードであるが、将来的に中継ノードにおける混雑／賑わいも同時に扱えるように、全てのノードを待ち行列とすることができる仕様とした。待ち行列についてはエージェントの到着がポアソン分布、サービス時間が指数分布であり、サービス窓口と系内行列数が定数である M/M/c/c タイプに対応した。本稿で扱う待ち行列は行列の上限を持たない M/M/c タイプであるが、これは最後のパラメータを十分に大きくすれば対応可能である。

通常、待ち行列の表現は図 2 に用いた記号を用いるが、サービス窓口数および行列数が多く、さらにノード数自体が多いことを考慮して、図 10 のような螺旋表現を用いて待ち行列を表現した。図はサービス窓口が 10、窓口の空きを待つ行列数を 35 としたものであり、1 から 4 に向かって時間が経過している。サービス時間はエージェントごとに指数分布で与えられる仕様としたため、2 の段階で窓口に加わったエージェントがそれ以前からサービスを受けていたエージェントより先にサービスが終了している。3 以降はその空いた窓口にもエージェントが移動し、後続のエージェントが 1 つずつ列を詰める様子が表わされている。

図 10 サービス窓口交代の表現

シミュレーションプログラムの表示画面を図 11 に示した。画面の例では 40,000 人のエージェントが 4,545 カ所の建物ノードで待ち行列を作っている。サービス窓口数を建物の延べ床面積に比例させているため、日比谷、丸の内、新橋の大規模建物においてサービス窓口が多数稼働しているのを見ることができる。

図 11 シミュレーションプログラムの表示画面

また、図 12 のように、建物ごと、クラスターごとに状況が把握できるように、表示モードを切り替えてエージェントのサービス・待ちの観察を行う仕様とした。

図 12 建物観察モード(左)およびクラスター観察モード(右)

エージェントの振る舞いは、ダイクストラ法により事前に計算されたルート情報から目的地までの行程を取得し、目的地に到着後、次の目的地を乱数で取得するというプロセスを繰り返す仕様とした。歩行速度は秒速 1m (時速 3.6km) とし、行き先値の設定については、全ての建物を等価に選択する A. 重みなしのパターンと、建物ノードが提供できるサービス率 μ (後述) に比例して選択確率が高くなる B. 重み付きの 2 通りを用意した。実際の都市回遊行動においては、近道よりも賑やかな街路を選択する、混雑している経路を回避する、行程の途中で興味を引いた店に立ち寄るなど、外的要因に左右される行動が想定されるが、シミュレーション手法の構築を目的とする本稿では、まずは最短ルートによるランダムウォークの観察を試みた。エージェントに与えた振る舞いは表 3 の通りである。

表 3 エージェントの振る舞い		
プロセス	A. 重みなし	B. 重み付き
1. 生成	全ての建物ノードから乱数で選択	μ に応じて選択
2. 行先設定	全ての建物ノードから乱数で選択 ルート情報を取得	μ に応じて選択 同左
3. 歩行	中継ノードに通過を通知	同左
4. 到着	待ち行列情報を取得、列に加わる プロセス 2 に戻る	同左 同左

4. ランダムウォークによるシミュレーション

4-1. ランダムウォークの基本的特性

選択確率を A=全ての建物ノードを等価に扱う場合と、B=サービス率 μ に比例して設定する場合に分けてシミュレーションを行う。

μ は時間当たりの被サービス人数であり、時間当たりのサービス人数にサービス窓口数を乗じたものである。時間当たりのノードへの到着人数＝到着率 λ が μ を上回ると待ち行列が発生する。

まず、サービス窓口数は建物の延床面積に比例、サービス時間は全て均一に 10 分間としてシミュレーションを行った。結果をノードの総通過人員で得るため延床面積と窓口の比例係数は結果には影響しないが、最も小さい建物でも 1 つのサービス窓口が得られるように、サービス窓口は 40m² に 1 つに設定されている^{注 3)}。この条件で中継ノードの総通過人員が 10,000,000 人になるまでランダムウォークを繰り返し、得られた通過量の分布およびシミュレーションの結果を図 13 および表 5 に示した。

図 13 中継ノードの通過人数分布：A.重みなし(左) B.重み付き(右)

表 4 シミュレーション結果

	A. 重みなし	B. 重み付き
エージェント数	50,000	50,000
シミュレーション時間	117.8 分	105.7 分
滞在時間		
平均	25.3 分	22.4 分
標準偏差	8.1 分	7.7 分
滞在回数		
平均	2.4 回	2.1 回
標準偏差	0.7 回	0.7 回
歩行距離		
平均	5419.5m	4861.7m
標準偏差	485.1m	459.5m

図に示されているように、目的地の設定に際して全ての建物を平等に扱う A パターンでは画面右下築地方面に向かって通過量が多く、建物の規模に比例して行き先を決められている B パターンでは画面左上の日比谷、丸の内近辺の通過量が多くなっている。このとき、A パターンにおいては、任意に選ばれた 2 点間のルート上の通過人員の累計が表されているから、その分布は式(5)のように定式化される媒介中心性の分布と等しくなる。

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1; k=1; j \neq k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (5)$$

ここで n_{jk} は任意のノード j から任意のノード k に至る最短経路の数であり、 $n_{jk}(i)$ はその経路のうち i を通るものの数である。また、 N は全てのノード数を意味している。本稿における中心性の計算はユークリッド距離に基づいており、 n_{jk} の数は必ず 1、 $n_{jk}(i)$ の値は 0 または 1 となるため、ノード i の媒介中心性は、ノード i を除くネットワーク上の 2 点を結ぶ全ての最短経路におけるノード i の出現確率となる。

一方、B パターンについては出発点および目的地の選択確率をそれぞれの延床面積に比例させているため、通過量分布は式(6)のように重み付き媒介中心性に沿ったものになると予想される。

$$C_i^{BW} = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1; k=1; j \neq k \neq i}^N n_{jk}(i) \times \left(\frac{W_j}{\sum_{i=0}^N W_i} \times \frac{W_k}{\sum_{i=0}^N W_i} \right) \quad (6)$$

W_j と W_k はそれぞれノード j およびノード k における重み＝延床面積であり、それぞれを全ての建物の床面積で除した出現確率の積が両ノードの経路上のノード i に加算されると予想される。

C^B をおよび C^{BW} をダイクストラ法を用いて求め、シミュレーションで得られた通過量の分布との相関を図 14 のように調べた。いずれも相関が強く出ていることから、ランダムウォークによる中継ノードの通過人員量は媒介中心性値に比例することが確認できた。

図 14 通過人数と中心媒介性の相関：A.重みなし(左) B.重み付き(右)

また、これら通過人員量および媒介中心性値について、実際の銀座における歩行者流動者調査との比較を行った。比較対象として東京都産業労働局による「東京都における繁華街利用実態調査」¹³⁾から、平成 12 年 10 月の銀座地区 17 地点の歩行者量 (図 15 に図示) のデータを使用した。データは街路断面歩行者量であるため、リンクについての媒介中心性を、重みなし・重み付きの両方の場合について計算し、調査地点に対応する 17 のリンクの媒介中心性と実際の歩行者交通量の相関係数を求めた。

図 15 東京都による調査地点

図 16 媒介中心性と歩行者量相関係数

図 16 に示したように、銀座地区における実際の歩行者流動と媒介中心性分布の相関係数は、建物延床面積による重みを考慮した場合には 0.6 程度である。この値は決して高いものとは言えないが、実際の通行量調査に費やされる膨大な労力と時間を考えると、簡便に算出できる媒介中心性指標には、街路ネットワークの潜在的な歩行者流動量を示す粗いモデルとしての可能性があると思われる。実際の歩行者流動に近いシミュレーション手法を構築するためには、歩行者の回遊行動パターン、建物用途に応じた選択行動、来街拠点

となる駅の影響などを考慮することが必要となるが、本研究においては、まずは相関係数 0.6 程度の媒介中心性指標をベースとして、シミュレーション手法の構築を先に進めることとする。

4-2. サービス窓口とサービス時間の相関

以上、サービス率 μ によって重み付けをした場合の通過量の分布を調べた。 μ は時間当たりのサービス回数×サービス窓口数であるから、窓口を倍増しても、サービス回数を倍増しても、建物ノードのサービス率は倍増することになり、通過量分布状況には変化がないことが予想される。これはサーバーのフロー制御において、送受するパケットのサイズを倍にすると、送信レート（回数）を倍にするのが同じであることと同義である。

しかしながら、サービス率が同じであってもサービス窓口が多ければ系内の平均滞在者は多くなり、逆に少なれば街路上に溢れる人数が多くなる。図 17 を用いて説明すると、建物 A と建物 B は 1 分あたり 1 人という同じサービス率を持っているが、A は B より多くのサービス窓口に客を長く滞在させているため、建物内にいる人数が多い。その一方、B はサービス時間が短く、建物から出てくる人数が A よりも大きいため、街路上に多くの歩行者を送り出している。本稿ではこれに着目し、建物内にいるエージェントの率と街路上のエージェントの比率＝建物内外比を調べ、サービス窓口・サービス時間の変化が建物内外比にどのような影響を考察する。

図 17 サービス窓口／サービス率と系内滞在者の関係

表 5、図 18 は 100 m²ごとに 60 分のサービスを行う窓口を 1 つ与えたときのサービス率 μ を保ちつつ、全ての建築ノードにおいて窓口数とサービス時間の値を変化させたときの、エージェントの建物内の滞在率である。表 6 のように、エージェント数を 10,000 に設定し、建物ノードでの平均滞在回数=5 となった時点でシミュレーションを終了した。サービス時間・窓口総数が半減していくのに従い、建物内滞在率が小さくなることを見ることができる。

「街に賑わいをもたらす」と言ったとき、それが屋内についての賑わいであれば窓口のサービス時間（滞在時間）を増やし、街路の賑わいであればサービスの回転率を高めれば良いことがここから分かる。この知見に基づき、以降では特定のクラスター内の建物ノードの窓口数とサービス時間の値を変化させ、その影響を見る。

表 5 建物内外比の遷移		
滞在時間	窓口総数	建物内滞在率
120 分	170,234	64.8%
60 分	85,485	47.8%
30 分	42,806	38.8%
15 分	22,002	28.4%
7.5 分	12,163	22.1%
全ての場合について $\mu=0.01$ 人/時・m ²

図 18 エージェントの建物内外比

表 6 シミュレーション結果

	120 分	60 分	30 分	15 分	7.5 分
エージェント数	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
シミュレーション時間	809.9 分	408.9 分	318.5 分	237.8 分	176.7 分
滞在時間	平均 595.0 分 標準偏差 49.9 分	平均 299.6 分 標準偏差 31.7 分	平均 151.5 分 標準偏差 21.5 分	平均 77.4 分 標準偏差 13.9 分	平均 36.9 分 標準偏差 7.5 分
滞在回数	平均 5.0 回 標準偏差 0.7 回	平均 5.0 回 標準偏差 0.7 回	平均 5.0 回 標準偏差 0.7 回	平均 5.0 回 標準偏差 0.8 回	平均 5.0 回 標準偏差 0.9 回
歩行距離	平均 9666.0m 標準偏差 1885.5m	平均 9428.8m 標準偏差 1557.5m	平均 9407.6m 標準偏差 1201.4m	平均 9324.1m 標準偏差 838.0m	平均 8204.7m 標準偏差 481.9m

4-3. 特定クラスターの操作による影響のシミュレーション

前節では銀座地区の 1.5km 四方、総数 4545 の建物ノードの待ち行列特性を一斉に変えることでその影響についての観察を行った。ここでは操作対象を特定クラスターに絞り、その影響を考察する。図 19 のように、対象として地区中央のクラスターを 1 つ、またクラスター 2 つを離れた場合を選び、これらのクラスターの窓口数とサービス時間の値を変化させたときの影響をシミュレーションする。

図 19 操作対象とするクラスター：A. 集中型(左) B. 分散型(右)

表 7 シミュレーションの条件設定

配置	クラスター	建物数	延床面積	滞在時間
A. 集中型	#39	136	194,856 m ²	60 分および 30 分
	上記以外	4,409	8,683,980 m ²	60 分に固定
B. 分散型	#5+#12	379	220,082 m ²	60 分および 30 分
	上記以外	4,409	8,658,754 m ²	60 分に固定
備考		・ 全ての場合について $\mu=0.01$ 人/時・m ² ・ 生成エージェント数は 10,000 ・ 平均滞在回数=5 回でシミュレーションを終了		

両方の条件において表 7 のように設定を定め、全てのサービス率を 100 m²ごとに 60 分のサービスを行う窓口を 1 つ ($\mu=0.01$ 人/時・m²) とした場合の歩行者流動をシミュレーションし、次に特定クラスターのみサービス時間を他の半分である 30 分に、また窓口数を半分にした場合のシミュレーションを行った。4-2 で得た知見によれば、サービス時間と窓口を減らした場合、建物内に留まることができないエージェントは街路に溢れていくと予想される。その影響が街路上にどのように溢れていくかを考察した。

シミュレーションの結果を表 8 に、歩行者の通過頻度の増減を図 20 および 21 に示した。まず、通過頻度の変化に関しては双方ともクラスター近辺において大きな変化を見ることができる。A においては、特定クラスターの近傍において通過頻度の減少を見ることができる。これはクラスターから流出するエージェントが増えたとしても、その増加量に応じて遠方の目的地に向かうエージェントも増えるため、近傍の選択確率が減少したことが原因と考えられる。また、B においては 2 つのクラスターを結ぶ最短距離沿いに通過頻度が増えている。これは歩行者流動の増加に伴い、2 つのクラスター間の経路の選択確率が増えたことに由来すると考えられる。

図 20-1 A. 集中型のサービス時間/窓口数半減による通過頻度(増加分)

図 21-2 B. 集中型のサービス時間/窓口数半減による通過頻度(減少分)

図 20-2 A. 集中型のサービス時間/窓口数半減による通過頻度(減少分)

図 21-1 B. 集中型のサービス時間/窓口数半減による通過頻度(増加分)

表 8 集中型/分散型のサービス時間の変更とシミュレーション結果

シミュレーション番号	A-1	A-2	B-1	B-2
クラスター 39 のサービス時間	60 分	30 分		
クラスター 5,12 のサービス時間			60 分	30 分
上記以外のサービス時間	60 分	60 分	60 分	60 分
エージェント数	10,000	10,000	10,000	10,000
シミュレーション時間	531.5 分	531.5 分	494.0 分	481.6 分
滞在時間	平均 311.7 分	平均 311.7 分	平均 288.8 分	平均 292.0 分
	標準偏差 36.1 分	標準偏差 36.1 分	標準偏差 33.2 分	標準偏差 32.4 分
滞在回数	平均 5.0 回	平均 5.0 回	平均 5.0 回	平均 5.0 回
	標準偏差 0.7 回	標準偏差 0.7 回	標準偏差 0.7 回	標準偏差 0.7 回
歩行距離	平均 10337.6m	平均 10337.6m	平均 10379.0m	平均 9988.2m
	標準偏差 1772.9m	標準偏差 1772.9m	標準偏差 1699.6m	標準偏差 1650.6m

4.4. クラスタ間の影響についてのシミュレーション

次に特定クラスターのサービス時間/窓口総数を大きく変化させたときの周囲への影響をクラスター単位で観察する。図 22、図 23 はサービス時間を 120 分から 15 分まで短縮し、エージェントを街路に溢れさせたときの建物内外比の増加率をクラスターごとに示したものである。設定およびその結果は表 9、表 10 の通りである。

表 9 シミュレーションの条件設定

配置	クラスター	建物数	延床面積	滞在時間
A. 集中型	#39	136	194,856 m ²	15 分および 120 分
	上記以外	4,409	8,683,980 m ²	60 分に固定
B. 分散型	#5+#12	379	220,082 m ²	15 分および 120 分
	上記以外	4,409	8,658,754 m ²	60 分に固定
備考				
<ul style="list-style-type: none"> 全ての場合について $\mu=0.01$ 人/時・m² 生成エージェント数は 10,000 平均滞在回数=5 回でシミュレーションを終了 				

表 10 シミュレーションの結果

シミュレーション番号	A-3	A-4	B-3	B-4
クラスター 39 のサービス時間	15 分	120 分		
クラスター 5,12 のサービス時間			15 分	120 分
上記以外のサービス時間	60 分	60 分	60 分	60 分
エージェント数	10,000	10,000	10,000	10,000
シミュレーション時間	484.7 分	508.5 分	518.0 分	509.6 分
滞在時間	平均 288.8 分	平均 310.7 分	平均 288.8 分	平均 311.7 分
	標準偏差 33.2 分	標準偏差 36.1 分	標準偏差 37.8 分	標準偏差 36.1 分
滞在回数	平均 5.0 回	平均 5.0 回	平均 5.0 回	平均 5.0 回
	標準偏差 0.8 回	標準偏差 0.7 回	標準偏差 0.7 回	標準偏差 0.7 回
歩行距離	平均 10379.0m	平均 10355.5m	平均 12366.7m	平均 10337.6m
	標準偏差 1699.6m	標準偏差 1845.9m	標準偏差 2010.1m	標準偏差 1772.9m

図 22 A. 集中型のクラスターのサービス率操作の影響域

図 23 B. 分散型のクラスターのサービス率操作の影響域

A の集中型については、概ね操作クラスターの周囲を囲む形で内外比の増加を見ることができる。ただ、図中に示したように最も内外比が増えるのは近傍ではなく、離れたクラスターであることが特徴的である。B については、地区全体において内外比の変化を見る点が特筆される。表 5 に示したように、A のクラスターと B のクラスターの総延床面積には大きな違いはなく、建物外に溢れ出るエージェントもほぼ同規模だと考えられる。それにも関わらず、内外比の変化が全域に渡り、その変化幅も大きいことは、分散型のサービス率操作の方が影響力が高いことを示していると考えられる。

5. 結論

以上、待ち行列ネットワークによる建物街路ネットワークの研究について、その論拠、データ構築方法、シミュレーション手法および得られる結果の定性的把握を行った。結論として、(1) エンドノードである建物ノードによっても街路ネットワークの輻輳（賑わい）を操作することが可能である、(2) 分散型の操作の方がより広域に、より大きく影響を与えることができる、を得ることができ、研究手法の有効性を確認することができた。今後は分析のスケールより細かなものとし、個々の建物がクラスター内で発揮する影響についての分析を行いたい。

参考文献

- 1) G. E. Hausmann: Memoires du Baron Haussmann, pp. 59-63, BiblioLife (復刻版), 1893
- 2) N. L. Biggs, E. K. Lloyd, R. J. Wilson: Graph Theory 1736-1936, pp. 1-11, Clarendon Press, 1976
- 3) K. Lynch: The Image of the City, MIT Press, 1960
- 4) 阿部大輔: パルセロナ旧市街の再生戦略, 学芸出版社, 2009
- 5) B. Hillier, J. Hanson: The Social Logic of Space, Cambridge University Press, 1984
- 6) S. Porta, P. Crucitti, V. Latora: The network analysis of urban streets: A dual approach, Physica A 369, pp. 853-866, 2006
- 7) A. Sevtsuk: Urban Network Analysis - A new toolbox for ArcGIS, MIT CityForm Lab. <http://cityform.mit.edu/files/UNAPaper.pdf> (2012 年 10 月 1 日確認), 2011
- 8) 目黒公郎, 織田浩平: 災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発, 生産研究, 57 巻 4 号, pp. 155-159, 2005
- 9) F. R. B. Cruz, J. M. Smith: Approximate analysis of M/G/c/c state dependent queueing networks, Computers & Operations Research 34, pp. 2332-2344, 2007
- 10) 川村秀憲: テーマパーク問題のマルチエージェントによる定式化と調整アルゴリズムに関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処理 102(613), pp. 25-30, 2003-01-22, 2003
- 11) P. Blanchard, D. Volchenkov: Exploring Urban Environments By Random Walks, Stochastic and quantum dynamics of biomolecular systems, Bernido CC, Springer, 2008
- 12) M. Girvan, M. E. M. Newman: Community structure in social and biological networks, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 99, No. 12, pp. 7821-7826, 2002
- 13) 東京都産業労働局産業政策部: 東京都における繁華街利用実態調査, pp. 87-89, 2001

注

- 注1) 本研究は東京大学空間情報科学研究センターとの共同研究「2050 年までの東京圏の都市空間変容予測とその評価」および「東京の空地利用に関する研究」の一環として行われたものであり、本データは共同研究のために同センターから貸与されたものである。
- 注2) 通常のネットワーク分析では Q 値は 0.4~0.7 の値を取ることが多いとされるが、街路ネットワークの場合、(1) 隣接するクラスターから遠方のクラスターにリンクが張られないことがないため、クラスター間のリンクが相対的に少ない、(2) クラスター内部でのノード次数が低く、社会ネットワークや複雑ネットワークに比べてネットワーク密度が低い、ことにより、Q 値が高く出る傾向が強い。
- 注3) 対象地域 225ha 内の総延床面積は 8,683,980 m² であるため、サービス窓口の総数は 215,416 となった。すべてのサービス窓口に顧客がいると考えると、ヘクタール辺りの人口は 950 人であり、平成 12 年の国勢調査における中央区の昼間人口 689 人とほぼ等しい。

(2012年11月10日原稿受理, 2013年6月11日採用決定)